February 1995
(edited April 1995)

Radon*

Guideline

A maximum acceptable concentration (MAC) for radon in drinking water has not been established.

Identity, Use and Sources in the Environment

Radon-222 is a chemically inert gas formed through the radioactive decay of ^{226}Ra. Both are members of the ^{238}U decay series. Radon-222 has a half-life of 3.82 days. Its decay products form a series of short-lived radionuclides (all solid elements) that decay within hours to ^{210}Pb (half-life of 22 years). Because of their short half-lives, the radon daughters rapidly approach radioactive equilibrium with their radon parent.

Radon is soluble in water, its solubility decreasing rapidly with an increase in temperature (510, 230 and 169 cm^3/kg at 0°C, 20°C and 30°C, respectively).[1] Radon is extremely volatile and is readily released from water.

Uranium and radium are present in varying amounts in all rocks and soils. Although most of the radon produced in soil from radium is retained in the earth, where it decays, a small portion diffuses into the pore spaces and hence into the atmosphere. One square metre of typical soil containing radium at 0.03 Bq†/g will release between 1000 and 2000 Bq of radon to the atmosphere each day.[2] Other sources of radon include groundwater that passes through radium-bearing rocks and soils, traditional building materials such as wallboard and concrete blocks, uranium tailings, coal residues and fossil fuel combustion.

*The term "radon" is used in this supporting document to refer to the isotope ^{222}Rn. Other radon isotopes are also ubiquitous in nature but generally present a much smaller risk than ^{222}Rn.

†The international unit that measures radioactivity is the becquerel (Bq), which is equal to one transformation per second. One becquerel is approximately equivalent to 27 picocuries (pCi) (1 Ci = 3.75×10^{10} Bq).

Exposure

Radon is the major source of naturally occurring radiation exposure for humans. Exposure occurs via the ingestion of radon dissolved in water and the inhalation of airborne radon.

There are few data on radon concentrations in Canadian drinking water supplies. Water drawn from surface supplies does not generally contain appreciable levels of radon, which are expected to be on the order of 0.01 Bq/L.[2] One survey of Canadian groundwater sources containing elevated levels of radon found radon concentrations in the range 1.7 to 13.7 kBq/L in Halifax County, Nova Scotia.[3] A second survey detected radon at concentrations as high as 3 kBq/L in well water in Harvey, New Brunswick, with 80% of the wells containing radon concentrations below 740 Bq/L.[4] A U.S. survey estimated geometric mean radon levels in public water supplies, public groundwater supplies and private wells of 2.5, 4.8 and 34 Bq/L.[5] Public wells analysed by King *et al.*[6] and Krishnaswami *et al.*[7] contained radon at an average concentration of about 40 Bq/L. Hopke[8] cited a U.S. study that found that 74% of wells surveyed contained less than 74 Bq/L radon and no more than 5% contained concentrations at or above 370 Bq/L. Nazaroff *et al.*[9] reported a geometric mean radon concentration of 5.2 Bq/L in public well water supplies in the United States, based on population-weighted statistics. Cothern[10] tabulated U.S. data on radon in groundwater and calculated that the national average population-weighted concentration of radon in drinking water is about 9 Bq/L for public water supplies that serve more than 1000 people and about 29 Bq/L for supplies serving fewer than 1000 people. Crawford-Brown and Cothern[11] estimated the population-averaged concentration of radon in U.S. public drinking water supplies to be 5.6 Bq/L. In Finland and Sweden, the population-weighted average for drinking water from private wells has been estimated at 60 and 38 Bq/L, respectively.[2]

Outdoor radon concentrations vary seasonally and diurnally and are influenced by height above ground level and meteorological conditions such as wind speed

and temperature.[2] Outdoor radon levels were measured in 78 communities across Canada during the summers of 1990 and 1991.[12] Under unusually low precipitation conditions, outdoor radon levels for the Prairie provinces averaged 60 Bq/m^3 during the summer of 1990. The much lower 1991 measurements for Manitoba (10 Bq/m^3) and Saskatchewan (15 Bq/m^3) were believed to be due to the increased precipitation in the prairie regions that summer compared with the previous summer. In general, the average radon level in outdoor air for continental locations in temperate latitudes is about 9 Bq/m^3.[2,13] Enhanced levels will be found in the vicinity of uranium mines and mill and tailings operations.[10]

Indoor radon levels are typically much higher and much more variable than outdoor levels. Radon entry into houses and other buildings is primarily from the soil or rock under the structures. Radon in water, building materials and natural gas can also contribute to indoor levels,[2] particularly in confined spaces with low air change rates (e.g., homes that have been tightly sealed for energy conservation). UNSCEAR[2] estimates an average population-weighted indoor radon concentration of about 50 Bq/m^3 for temperate regions of the world.

The relationship between the concentration of radon in the water supply and the concentration of radon in indoor air depends on several factors, including the rate and type of usage of the water (e.g., drinking water, showers, laundry), the loss or transfer of radon from the water to the air and the characteristic ventilation of the house. The rate of release of radon from water depends on such factors as agitation, surface area and temperature.[14] Based on a water-to-air transfer factor of 10^4 to 1,[10,15,16] radon in water contributes on average about 1% to indoor levels.[17] Nazaroff *et al.*,[9] based on measurements in U.S. homes and water supplies, estimated that public supplies derived from groundwater serving 1000 or more persons contribute about 2% to the mean indoor radon concentration for houses using these sources.

In general, under normal conditions, the intake of radon from indoor and ambient air far surpasses the intake of radon from drinking water via both the ingestion and inhalation routes. The global average dose from the inhalation of radon from all sources is approximately 1 mSv[‡]/year,[18] which is slightly less than half the total natural radiation exposure of 2.4 mSv/year.[2] In comparison, the global dose from ingestion of radon in drinking water is relatively low.[18]

[‡]Sievert (Sv) is the unit of equivalent dose, equal to 1 J/kg, that is intended to express the biological implications of radiation exposure. Equivalent dose is the product of absorbed dose (in grays, Gy) and a radiation weighting factor specific to the type of radiation.

Analytical Methods and Treatment Technology

Two methods for the measurement of radon in water have been recommended by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) for routine measurements. The emanation method, in which radon is degassed from the water and transferred into a Lucas scintillation cell, has a detection limit of approximately 0.05 Bq/L for a sample volume of 100 mL.[19] In the liquid scintillation method, the water is injected directly into a scintillation solution and counted in an automated liquid scintillation device; this method has a detection limit of about 0.4 Bq/L using a sample volume of 10 mL.[20,21] All methods require careful sampling because of the rapid loss of radon from the water when it is agitated and open to the atmosphere. The U.S. EPA[15] estimated a practical quantitation limit (PQL) for radon in water (based on the ability of laboratories to measure radon within reasonable limits of precision and accuracy) to be about 10 or 11 Bq/L.

Radon in air can be detected using alpha track detectors (detection limit 40 Bq-month/L) or charcoal canisters (detection limit 20 Bq/L).[22]

There are two principal ways to remove radon from water supplies dependent on groundwater sources (water drawn from surface supplies or temporary storage containers will not contain any appreciable radon[2]). Aeration, which forces radon from the water to the air, can be highly effective; bubble plate aeration and diffused bubble aeration as point-of-entry units are capable of achieving removal efficiencies in excess of 99% at loading rates of 185 Bq/L and up.[23,24] The low-tech spray jet aeration technique, which is the most practical aeration method for small community water supplies, removes between 50% and 75% of the influent radon.[23,25] One concern with aeration is the possibility of creating a large source of airborne radon. Adsorption via granular activated carbon, with or without ion exchange, can also achieve high radon removal efficiencies (up to 99.7%, depending on the loading rate).[24] Two potential concerns associated with this technology are the elevated gamma radiation fields that develop close to the column and the waste disposal difficulties associated with the used carbon.

Health Effects**

Radon consumed in water appears to rapidly enter the bloodstream from the stomach,[26] perfusing all the cells of the body.[27] As it is lipid soluble,[28,29] it does not distribute evenly throughout the body.[30] Clearance of radon from the bloodstream is relatively rapid, with a half-time on the order of minutes.[31,32]

**The reader can refer to the supporting document on Radiological Characteristics for a more detailed description of the biological effects of radionuclides.

Hursh *et al.*[30] demonstrated that radon is removed from the body primarily through exhalation via the lung. Several studies have found that radon is removed from the body with a primary half-time of between 30 and 70 minutes, with a smaller component (possibly that associated with fatty tissue) having a half-time on the order of several hours.[26,33] The rate of radon elimination from a resting person appears to be slower than that for a physically active person.[27]

Most radon inhaled with indoor air is exhaled and remains in the lungs for only a short time. The radon daughter ^{218}Po is very reactive and electrostatically attracted to tiny particulates in air. These particulates are inhaled and deposited in the lung. Radon's daughters then decay sequentially, releasing damaging alpha and beta particles. Therefore, it is radon's progeny, not radon, that actually cause damage to the bronchial epithelium, because only the progeny remain in the lungs long enough to decay significantly.[10]

Epidemiological data derived from underground miners of various metal ores have shown a relatively consistent relationship between lung cancer incidence and exposure to radon progeny.[10,34] Limitations of the miner studies include crude exposure estimates, inadequate follow-up periods[34] and the inability to account for the confounding factor of cigarette smoking.[10] Although some researchers suggest that there might be a synergistic effect between radon and cigarette smoke, others have suggested that smoking may cause a thicker layer of mucus in the lungs, which may actually protect the lungs from alpha particles.[10]

With respect to inhalation risk, several national and international organizations have developed risk models based on epidemiological and radiobiological data for radon. Risk projections made using three of these models[35-37] suggest that the average lifetime risk from inhalation exposure to radon daughters is likely to be in the order of less than 100 cases per million WLM[**] to perhaps 500 cases per million WLM, with the lower value being applicable to females and non-smoking males and the higher value being applicable to a mixed population of females and smoking and non-smoking males.[38]

Comparatively few epidemiological studies have investigated the exposure to natural background radon levels, and those that are available show no significant increase in lung cancer death rate from inhalation exposure to normally occurring levels of radon and radon progeny.[34,39,40] As well, there are no experimental or epidemiological data available that link ingested radon with any known health impacts in humans.[34]

Animal studies, most of them involving the inhalation of radon and radon progeny,[41,42] have provided considerable data confirming human epidemiology studies.[34] Although there have been some attempts to estimate the risk to animals from ingestion of radon and radon progeny, it has generally been concluded that the risk from ingestion is insignificant compared with the risk from inhalation.[10]

Classification and Assessment

No experimental or epidemiological studies have linked ingested radon with health impacts in humans, and it has generally been concluded from animal studies that the risk from ingestion is insignificant compared with the risk from inhalation. As well, radon that has emanated from water supplies into air generally contributes only 1% or 2% to the mean indoor radon concentration. Thus, under normal conditions, the intake of radon in ambient and indoor air generally far surpasses the intake of radon from drinking water via both ingestion and inhalation routes. Even these normally occurring levels of radon and radon progeny in indoor and ambient air have not been linked with an increase in lung cancer death rate from inhalation exposure in available epidemiological studies.

It has therefore been concluded that there is no need to establish a maximum acceptable concentration (MAC) for radon in drinking water. However, anyone whose indoor air radon concentrations exceed acceptable levels (800 Bq/m^3 as an annual average concentration in the normal living area)[43] should investigate the possibility that their groundwater also contains high levels of radon. Individuals who attempt to remove radon from their water supply using point-of-use devices containing activated carbon should be cautioned regarding the difficulties of disposing of the used radioactive carbon.

References

1. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Measurement of radon and radon daughters in air. NCRP Report No. 97, Bethesda, MD (1988).

2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York, NY (1988).

3. McGregor, R.G. and Gourgon, L.A. Radon and radon daughters in homes utilizing deep well water supplies, Halifax County, Nova Scotia. J. Environ. Sci. Eng., 15(1): 25 (1980).

[**] As it is radon's progeny that cause lung damage, the concentrations of radon progeny in air should be measured rather than the concentration of radon. One working level (WL) is defined as the combination of radon progeny in 1 L of air that results in the emission of 1.3×10^5 MeV of alpha particle energy. One WL is numerically equivalent to 3700 Bq/m^3 of radon in equilibrium with its short-lived daughters. One WLM is a unit of exposure corresponding to an exposure to 1 WL for a period of one working month (170 hours).

4. McBride, J.L. and Davies, K.L. Natural radioactivity measurements for the Harvey area, York County, N.B. Radiation Protection Services, New Brunswick Department of Health, Fredericton (1981).

5. Hess, C.T., Michel, J., Horton, T.R., Prichard, H.M. and Conglio, W.A. The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. Health Phys., 48(5): 553 (1985).

6. King, P.T., Michel, J. and Moore, W.S. Ground water geochemistry of ^{228}Ra, ^{226}Ra and ^{222}Rn. Geochim. Cosmochim. Acta, 46: 1173 (1982), cited in reference 27.

7. Krishnaswami, S., Graustein, W.C., Turekian, K.K. and Dowd, J.F. Radium, thorium and radioactive lead isotopes in ground waters: application to the *in-situ* determination of adsorption–desorption rate constants and retardation factors. Water Resourc. Res., 18: 1633 (1982), cited in reference 27.

8. Hopke, P.K. The indoor radon problems explained for the layman. ACS Symp. Ser., 331: 572 (1987), cited in reference 27.

9. Nazaroff, W.W., Doyle, S.M., Nero, A.V. and Sexton, R.G. Potable water as a source of airborne ^{222}Rn in U.S. dwellings: a review and assessment. Health Phys., 52: 281 (1987), cited in reference 27.

10. Cothern, C.R. Estimating the health risks of radon in drinking water. J. Am. Water Works Assoc., April: 153 (1987).

11. Crawford-Brown, D. and Cothern, C. A Bayesian analysis or scientific judgement of uncertainties in estimating risk due to Rn-222 in U.S. public drinking water supplies. Health Phys., 53: 11 (1987), cited in reference 33.

12. Grasty, R. Summer outdoor radon variations in Canada and their relation to soil moisture. Health Phys., 66(2): 185 (1994).

13. Gesell, T.F. Background atmospheric ^{222}Rn concentrations outdoors and indoors: a review. Health Phys., 45(2): 289 (1983).

14. Becker III, A.P. and Lachajczyk, T.M. Evaluation of waterborne radon impact on indoor air quality and assessment of control options. EPA-600/7-84-093. Envirodyne Engineers, Inc., St. Louis, MO (1984).

15. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). National primary drinking water regulations; radionuclides; proposed rules. Fed. Regist., 56(138): 33050 (1991).

16. Life Systems, Inc. Radon in drinking water: assessment of exposure pathways. TR-1242-87. Prepared for Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, June (1991).

17. Crawford-Brown, D.J. An analysis of the risk of fatal cancer resulting from the occurrence of Rn-222 in public drinking water supplies, the uncertainty in risk estimates employed for establishing standards, and the impact of mitigation on the public health. Pre-publication copy. Prepared for the American Water Works Association (1991).

18. World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality. 2nd edition. Vol. 1. Recommendations. Geneva (1993).

19. Crawford-Brown, D. and Michel, J. Measurement. In: Environmental radon. C. Cothern and J. Smith (eds.). Plenum Press, New York, NY. p. 59 (1987). Cited in Clement Associates, Inc. Toxicological profile for radon (draft). Prepared for Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, October (1989).

20. Prichard, H.M. and Gesell, T.F. Rapid measurement of ^{222}Rn concentration in water with a commercial liquid scintillation counter. Health Phys., 33(6): 577 (1977).

21. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Method 913 — Radon in drinking water by liquid scintillation. EPA Report EMSL/LV, June (1991).

22. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Implementation strategy for the radon/radon progeny measurement proficiency evaluation and quality assurance program. EPA 520/1-86-03. Office of Radiation Programs, Washington, DC (1986), cited in reference 10.

23. Dixon, K.L., Lee, R.G., Smith, J. and Zielinski, P. Evaluating aeration technology for radon removal. J. Am. Water Works Assoc., 83(4): 141 (1991).

24. Kinner, N.E., Malley, J.P., Clement, J.A. and Fox, K.R. Using POE techniques to remove radon. J. Am. Water Works Assoc., 85(6): 75 (1993).

25. RCG/Hagler, Bailly, Inc. The cost of compliance with the proposed federal drinking water standards for radionuclides. Pre-publication copy. Prepared for the American Water Works Association, October (1991).

26. Crawford-Brown, D.J. The biokinetics and dosimetry of radon-222 in the human body following ingestion of groundwater. Environ. Geochem. Health, 11: 10 (1989).

27. Gosink, T.A., Baskaran, M. and Holleman, D.F. Radon in the human body from drinking water. Health Phys., 59(6): 919 (1990).

28. International Research Council of the National Academy of Sciences. International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology. Vol. 3. National Academy of Sciences, Washington, DC (1928), cited in reference 27.

29. von Dobeln, W. and Lindell, B. Some aspects of radon contamination following ingestion. Arkiv. Fys., 27: 531 (1964), cited in reference 16.

30. Hursh, J.B., Morken, D.A., Davis, R.P. and Lovass, A. The fate of radon ingested by man. Health Phys., 11: 465 (1965), cited in reference 27.

31. Underwood, N. and Diaz, J. A study of the gaseous exchange between the circulating system and the lungs. Am. J. Physiol., 13: 88 (1941), cited in reference 33.

32. Lindell, B. Ingested radon as a source of human radiation exposure. In: Proceedings of the First International Congress of Radiation Protection. Pergamon Press, New York, NY. p. 719 (1968), cited in reference 33.

33. Crawford-Brown, D.J. Cancer fatalities from waterborne radon (Rn-222). Risk Anal., 11(1): 135 (1991).

34. Cross, F.T., Harley, N.H. and Hofmann, W. Health effects and risks from ^{222}Rn in drinking water. Health Phys., 48(5): 649 (1985).

35. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Measurement of radon and radon daughters in air. NCRP Report No. 97 (1988).

36. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Lung cancer from indoor exposure to radon daughters. ICRP Publication 50, Annals of the ICRP Vol. 17, No. 1 (1987).

37. U.S. National Academy of Sciences (NAS). Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Research Council, Washington, DC. National Academy Press (1988).

38. SENES Consultants Limited (SENES). An evaluation of the risk of exposure to radon daughters. Prepared for the American Mining Congress, April (1990).

39. Létourneau, E.G., Mao, Y., McGregor, R.G., Semenciw, R., Smith, M.H. and Wigle, D.T. Lung cancer mortality and indoor radon concentrations in 18 Canadian cities. Proceedings of the 16th Midyear Topical Symposium on Epidemiology Applied to Health Physics, January 10–14, 1983, Albuquerque, NM. Health Physics Society. p. 470 (1983).

40. Létourneau, E.G., Krewski, D., Choi, N.W., Goddard, M.J., McGregor, R.G., Zielinski, J.M. and Du, J. Case–control study of residential radon and lung cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada. Am. J. Epidemiol., 140(4): 310 (1994).

41. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Biological effects of inhaled radionuclides. ICRP Publication 31. Pergamon Press, New York, NY (1980), cited in reference 34.

42. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Evaluation of occupational and environmental exposure to radon and radon daughters. NCRP Report No. 78 (1984), cited in reference 34.

43. Department of National Health and Welfare. Exposure guidelines for residential indoor air quality. A report of the Federal–Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health. Environmental Health Directorate, Health Protection Branch, Ottawa (1990).

Février 1995
(révisé en avril 1995)

Le radon*

Recommandation

Aucune concentration maximale acceptable (CMA) n'a été établie pour le radon dans l'eau potable.

Propriétés physico-chimiques, utilisations et sources de contamination

Le radon-222 est un gaz chimiquement inerte formé lors de la désintégration radioactive du radium-226. Ces deux éléments sont des membres de la série radioactive de l'uranium-238. La demi-vie du radon-222 est de 3,82 jours. Ses produits de désintégration constituent une série de radionucléides à période courte (tous des éléments solides) qui, en quelques heures, se désintègrent en plomb-210 (demi-vie de 22 ans). Vu leurs courtes demi-vies, les produits de filiation du radon atteignent rapidement l'équilibre radioactif avec le radon dont ils découlent.

Le radon est soluble dans l'eau et sa solubilité diminue rapidement au fur et à mesure qu'augmente la température (510, 230 et 169 cm^3/kg à 0, 20 et 30 °C respectivement).[1] Le radon est extrêmement volatil et se dégage rapidement de l'eau.

L'uranium et le radium sont présents en diverses quantités dans toutes les roches et tous les sols. La plus grande partie du radon produit dans le sol à partir du radium est retenue dans la terre où elle se désintègre, mais une petite proportion atteint l'atmosphère en se diffusant dans l'espace poral. Une superficie de 1 m^2 d'un sol typique contenant 0,03 Bq/g de radium rejette quotidiennement entre 1 000 et 2 000 Bq de radon dans l'atmosphère.[2] Parmi les autres sources de radon, on compte les eaux souterraines qui s'écoulent dans des roches et des sols contenant du radium, les matériaux de construction classiques comme les panneaux de gypse et les blocs de béton, les stériles provenant de minerais uranifères, les résidus de charbon et l'utilisation de combustibles fossiles.

Exposition

Le radon constitue, pour les humains, la principale source d'exposition au rayonnement naturel. L'exposition se fait par ingestion de radon dissous dans l'eau et par inhalation de radon contenu dans l'air.

Il existe peu de données sur les concentrations de radon dans l'eau potable au Canada. En général, l'eau tirée des réserves de surface ne renferme pas de quantités appréciables de radon, les concentrations étant, estime-t-on, de l'ordre de 0,01 Bq/L.[2] Lors d'une étude des sources d'eaux souterraines canadiennes contenant des quantités élevées de radon, les concentrations de Rn étaient comprises entre 1,7 et 13,7 kBq/L dans le comté de Halifax, en Nouvelle-Écosse.[3] Une seconde étude a révélé des concentrations aussi élevées que 3 kBq/L dans de l'eau de puits à Harvey, au Nouveau-Brunswick, les concentrations de radon dans l'eau de 80 % des puits étant inférieures à 740 Bq/L.[4] Lors d'une étude effectuée aux États-Unis, la moyenne géométrique des concentrations de radon dans les sources d'approvisionnement en eau, dans les sources d'eau souterraines destinées à alimenter le public et dans l'eau des puits privés a été évaluée à 2,5, 4,8 et 34 Bq/L.[5] L'eau de puits publics analysée par King et coll.[6] et Krishnaswami et coll.[7] contenait en moyenne environ 40 Bq/L de radon. Hopke[8] a fait état d'une étude effectuée aux États-Unis selon laquelle l'eau de 74 % des puits étudiés contenait moins de 74 Bq/L de radon et que l'eau d'au plus 5 % de ces puits présentait des concentrations égales ou supérieures à 370 Bq/L. Nazaroff et coll.[9] ont signalé une moyenne géométrique de 5,2 Bq/L pour la concentration de radon dans les eaux de puits utilisées comme sources d'approvisionnement public aux États-Unis; cette moyenne avait été établie à partir de statistiques pondérées pour tenir compte de la population. Cothern[10] a compilé des données, obtenues aux États-Unis, sur le radon dans les eaux souterraines;

*L'appellation «radon» est utilisée dans ce document pour signifier l'isotope ^{222}Rn. D'autres isotopes du radon sont aussi omniprésents dans la nature, mais posent généralement un risque beaucoup plus faible que le ^{222}Rn.

†Le becquerel (Bq), unité internationale de radioactivité, correspond à une transformation par seconde. Un becquerel est égal à environ 27 picocuries (pCi) (1 Ci = 3,75 10^{10} Bq).

selon ses calculs, la valeur moyenne à l'échelle nationale de la concentration de radon dans l'eau potable, pondérée pour tenir compte de la population, est d'environ 9 Bq/L pour les sources d'approvisionnement du public desservant plus de 1 000 personnes et d'environ 29 Bq/L pour les sources d'approvisionnement desservant moins de 1 000 personnes. Selon Crawford-Brown et Cothern,[11] la concentration moyenne de radon dans les sources d'eau potable aux États-Unis, pondérée pour tenir compte de la population, est de 5,6 Bq/L. En Finlande et en Suède, la concentration moyenne de radon, pondérée pour tenir compte de la population, dans l'eau potable tirée de puits privés a été évaluée à 60 et à 38 Bq/L, respectivement.[2]

Les concentrations de radon à l'extérieur varient d'une saison à l'autre et d'une journée à l'autre et dépendent de la distance au-dessus du niveau du sol et des conditions météorologiques, telles que vitesse du vent et température.[2] La concentration de radon à l'extérieur a été mesurée dans 78 collectivités à travers le Canada à l'été 1990 et à l'été 1991.[12] Au cours de l'été 1990, caractérisé par des précipitations exceptionnellement faibles, les concentrations de radon à l'extérieur dans les provinces des Prairies étaient de 60 Bq/m^3 en moyenne. Les valeurs beaucoup plus faibles mesurées en 1991 au Manitoba (10 Bq/m^3) et en Saskatchewan (15 Bq/m^3) étaient dues, estime-t-on, aux précipitations plus élevées observées dans les régions des Prairies en 1991, en comparaison de celles mesurées au cours de l'été précédent. En général, la concentration moyenne de radon dans l'air extérieur dans des zones continentales situées à des latitudes tempérées est d'environ 9 Bq/m^3.[2,13] Les concentrations sont plus élevées à proximité de mines d'uranium et d'endroits où l'on manipule des minerais et des résidus miniers.[10]

Les concentrations de radon dans l'air à l'intérieur des habitations sont ordinairement beaucoup plus élevées et beaucoup plus variables que les concentrations dans l'air à l'extérieur. Le radon pénètre dans les maisons et autres bâtiments surtout à partir de la roche ou du sol sous-jacents. Le radon présent dans l'eau, dans les matériaux de construction et dans le gaz naturel peut aussi contribuer à la contamination de l'air intérieur,[2] en particulier dans les espaces confinés où le taux d'échange d'air est faible (par exemple, dans les maisons rendues hermétiques pour des raisons d'économie d'énergie). Selon le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants,[2] la concentration moyenne de radon à l'intérieur des habitations, pondérée pour tenir compte de la population, est d'environ 50 Bq/m^3 dans les régions tempérées.

La relation liant la concentration de radon dans les sources d'approvisionnement d'eau et la concentration de radon dans l'air à l'intérieur dépend de plusieurs facteurs, dont le taux et le type d'utilisation de l'eau (boisson, douche, lessive...), la perte ou le transfert de radon de l'eau vers l'air et les caractéristiques de ventilation de la maison. La vitesse de dégagement du radon contenu dans l'eau dépend de facteurs comme l'agitation, la superficie et la température.[14] En se basant sur un facteur de transfert eau-à-air compris entre 10^4 et 1,[10,15,16] on obtient une valeur d'environ 1 % pour la contribution moyenne de l'eau à la contamination de l'air intérieur par le radon.[17] À partir de mesures faites dans des maisons et des réserves d'eau aux États-Unis, Nazaroff et coll.[9] ont déterminé que les réseaux d'approvisionnement du public alimentés par des eaux souterraines desservant 1 000 personnes ou plus contribuaient pour environ 2 % à la concentration moyenne de radon à l'intérieur des maisons où l'on utilisait cette eau.

En général, en conditions normales, l'apport en radon à partir de l'air intérieur et de l'air ambiant dépasse de beaucoup la quantité de radon absorbée à partir de l'eau potable, tant par ingestion que par inhalation. La dose moyenne globale de radon absorbée par inhalation à partir de toutes les sources est d'environ 1 mSv[5]/année,[18] soit une dose légèrement inférieure à la moitié de la dose totale de rayonnement naturel, qui est de 2,4 mSv/année.[2] En comparaison, la dose globale de radon absorbée par ingestion d'eau potable est relativement faible.[18]

Méthodes de dosage et techniques de traitement

La U.S. Environmental Protection Agency (EPA) a recommandé deux méthodes pour le dosage de routine du radon dans l'eau. La méthode par émanation, dans laquelle le radon est chassé de l'eau par dégazage puis transféré dans une cellule à scintillation de Lucas, possède une limite de détection d'environ 0,05 Bq/L pour un échantillon de 100 mL.[19] Dans la méthode à scintillation liquide, l'eau est injectée directement dans une solution de scintillation, puis le comptage est réalisé dans un compteur à scintillation liquide automatisé; cette méthode possède une limite de détection d'environ 0,4 Bq/L pour un échantillon de 10 mL.[20,21] Avec toutes ces méthodes, il faut prélever les échantillons avec soin, car il y a perte rapide du radon contenu dans l'eau lorsque l'échantillon est agité et qu'il se trouve dans un contenant ouvert à l'atmosphère. Selon la U.S. EPA,[15] la limite de dosage pratique du radon dans l'eau (basée sur

[5]Le sievert, unité d'équivalent de dose égale à 1 J/kg, est une mesure des conséquences biologiques d'une exposition au rayonnement. L'équivalent de dose est le produit de la dose absorbée (en grays, Gy) par un facteur de pondération du rayonnement spécifique du type de rayonnement.

l'aptitude des laboratoires à doser le radon avec une précision et une justesse raisonnables) est d'environ 10 ou 11 Bq/L.

On peut détecter le radon dans l'air à l'aide de détecteurs de traces alpha (limite de détection de 40 Bq-mois/L) ou de cartouches de charbon (limite de détection de 20 Bq/L).[22]

Il existe deux méthodes principales pour débarrasser l'eau du radon qu'elle contient, selon les sources d'eaux souterraines (l'eau provenant des sources d'approvisionnement de surface ou de contenants d'entreposage temporaires ne contient pas de quantités appréciables de radon).[2] L'aération, qui chasse le radon contenu dans l'eau, peut être très efficace; l'aération à l'aide d'une plaque de barbotage et l'aération par barbotage diffus aux points d'entrée de l'eau possèdent une efficacité d'élimination pouvant dépasser 99 % à un taux de contamination égal ou supérieur à 185 Bq/L.[23,24] La technique d'aération à jet de pulvérisation, qui n'est pas une technique de pointe, est la méthode d'aération la plus pratique pour les petites collectivités; elle permet d'éliminer de 50 à 75 % du radon contenu dans l'eau.[23,25] L'aération suscite de l'inquiétude, car elle risque de créer une source importante de radon atmosphérique. L'adsorption sur des granules de charbon actif, avec échange ionique ou non, permet aussi d'éliminer très efficacement le radon (jusqu'à 99,7 % selon le taux de contamination).[24] Cette technique comporte deux problèmes potentiels : la création de champs intenses de rayonnement gamma à proximité de la colonne et l'élimination des déchets découlant de l'utilisation de carbone.

Effets sur la santé**

Le radon absorbé avec l'eau semble entrer rapidement dans le sang à partir de l'estomac,[26] puis il est distribué dans toutes les cellules de l'organisme,[27] mais cette distribution n'est pas uniforme[30] en raison de la liposolubilité du Rn.[28,29] La clairance du radon contenu dans le sang est relativement rapide, la demi-vie d'élimination se comptant en minutes.[31,32]

Hursh et coll.[30] ont montré que l'élimination du radon de l'organisme s'effectue surtout par exhalation par les poumons. Plusieurs études ont révélé que la demi-vie d'élimination de la plus grande partie du radon est comprise entre 30 et 70 minutes; la demi-vie d'élimination du reste (probablement associé aux tissus adipeux) est de quelques heures.[26,33] La vitesse d'élimination du Rn semble être plus faible chez une personne au repos que chez une personne physiquement active.[27]

**Pour obtenir une description plus détaillée des effets biologiques des radionucléides, le lecteur peut consulter le document à l'appui portant sur les caractéristiques radiologiques.

La plus grande partie du radon inhalé avec l'air intérieur est exhalée, la durée du séjour dans les poumons étant très courte. Le ^{218}Po, un produit de filiation du radon, est très réactif et s'agglomère par attraction électrostatique aux fines particules en suspension dans l'air. Ces particules sont inhalées et se déposent dans les poumons. Les produits de filiation du radon se désintègrent ensuite les uns à la suite des autres en émettant des particules alpha et bêta qui sont nocives. Ce sont donc les descendants radioactifs, non le radon, qui, en fait, endommagent l'épithélium des bronches, car seuls ces descendants demeurent assez longtemps dans les poumons pour se désintégrer en quantité notable.[10]

Des données épidémiologiques obtenues à partir de personnes travaillant dans des mines souterraines où l'on procédait à l'extraction de divers minerais ont révélé l'existence d'une relation relativement cohérente entre l'incidence du cancer du poumon et l'exposition aux descendants radioactifs du radon.[10,34] Les études portant sur les mineurs comportent des limitations, en particulier l'imprécision des estimations de l'exposition, l'inadéquation des périodes de suivi et l'incapacité de rendre compte du facteur de confusion qu'est la cigarette.[10] Bien que certains chercheurs laissent supposer l'existence d'un effet synergique entre le radon et la cigarette, d'autres prétendent que la fumée de cigarette provoque dans les poumons un épaississement de la muqueuse, ce qui protégerait en fait les poumons contre les particules alpha.[10]

Pour ce qui est du risque propre à l'inhalation, plusieurs organismes nationaux et internationaux ont élaboré des modèles de risques à partir de données épidémiologiques et radiologiques sur le radon. Selon des projections obtenues avec trois de ces modèles,[35-37] le risque moyen d'une exposition par inhalation de produits de filiation du radon couru pendant toute la vie varie probablement de moins de 100 cas par million d'unités opérationnelles – mois†† à peut-être 500 cas par million d'unités opérationnelles-mois, la valeur inférieure s'appliquant aux hommes fumeurs et aux femmes et la valeur élevée s'appliquant à une population constituée d'hommes fumeurs et non fumeurs et de femmes.[38]

††Les dommages pulmonaires étant causés par les descendants radioactifs du radon, il faut mesurer les concentrations de ces descendants dans l'air plutôt que la concentration de radon. Une unité opérationnelle est définie comme la combinaison de descendants radioactifs du radon dans 1 L d'air qui entraîne l'émission de $1,3 \times 10^5$ MeV d'énergie sous forme de particules alpha. Une unité opérationnelle est numériquement égale à 3 700 Bq/m3 de radon en équilibre avec ses produits de filiation à période courte. Une unité opérationnelle-mois est une unité d'exposition correspondant à une exposition d'une unité opérationnelle pendant une période d'un mois ouvrable (170 heures)

Comparativement peu d'études épidémiologiques ont porté sur l'exposition aux concentrations de fond de radon; les études disponibles montrent que l'exposition par inhalation à des concentrations de radon et de ses descendants présents normalement dans le milieu n'entraîne aucun accroissement du taux de mortalité par cancer du poumon.[34,39,40] De plus, il n'existe aucune donnée expérimentale ou épidémiologique permettant de lier l'ingestion de radon à des effets connus sur la santé chez les humains.[34]

Des études effectuées chez les animaux, comportant dans la plupart des cas l'inhalation de radon et de descendants du radon,[41,42] ont fourni des données considérables venant confirmer les données obtenues lors d'études épidémiologiques chez les humains.[34] Il y a eu certaines tentatives de mesure du risque d'exposition par ingestion au radon et aux descendants du radon chez les animaux, mais on a conclu, en général, que le risque lié à l'ingestion est négligeable en comparaison du risque lié à l'inhalation.[10]

Classification et évaluation

Aucune étude expérimentale ou épidémiologique n'a permis de lier l'ingestion du radon à des effets sur la santé chez les humains; en général, on a conclu, à la suite d'études chez les animaux, que le risque lié à l'ingestion est négligeable en comparaison du risque lié à l'inhalation. De plus, le radon rejeté dans l'air à partir de l'eau des sources d'approvisionnement ne contribue généralement que pour 1 ou 2 % à la concentration moyenne de radon dans l'air à l'intérieur. Ainsi, dans des conditions normales, l'apport en radon à partir de l'air ambiant et de l'air à l'intérieur dépasse généralement de beaucoup l'apport en radon à partir de l'eau potable, et ce, tant par ingestion que par inhalation. Même ces concentrations de radon et de descendants du radon présents normalement dans l'air à l'intérieur et dans l'air ambiant n'ont pu être liées, dans les études épidémiologiques disponibles, à un taux de mortalité accru par cancer du poumon consécutif à une exposition par inhalation.

Il n'est donc pas nécessaire, conclut-on, d'établir une concentration maximale acceptable (CMA) pour le radon dans l'eau potable. Toutefois, il y a lieu de déterminer si les eaux souterraines contiennent des quantités élevées de radon, dans chaque cas où la concentration de Rn dans l'air à l'intérieur est supérieure aux concentrations acceptables (concentration annuelle moyenne de 800 Bq/m^3 dans les aires habitables).[43] Toute personne tentant de débarrasser ses réserves d'eau du radon qu'elles contiennent en utilisant des appareils à charbon actif devrait être informée des difficultés que comporte l'élimination du carbone radioactif.

Références bibliographiques

1. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Measurement of radon and radon daughters in air. Rapport n° 97 du NCRP, Bethesda, MD (1988).

2. Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Rapport présenté à l'Assemblée générale, avec annexes. Nations Unies, New York, NY (1988).

3. McGregor, R.G. et Gourgon, L.A. Radon and radon daughters in homes utilizing deep well water supplies, Halifax County, Nova Scotia. J. Environ. Sci. Eng., 15(1) : 25 (1980).

4. McBride, J.L. et Davies, K.L. Natural radioactivity measurements for the Harvey area, York County, N.B. Radiation Protection Services, New Brunswick Department of Health, Fredericton (1981).

5. Hess, C.T., Michel, J., Horton, T.R., Prichard, H.M. et Conglio, W.A. The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. Health Phys., 48(5) : 553 (1985).

6. King, P.T., Michel, J. et Moore, W.S. Ground water geochemistry of ^{228}Ra, ^{226}Ra and ^{222}Rn. Geochim. Cosmochim. Acta, 46 : 1173 (1982), cité à la référence 27.

7. Krishnaswami, S., Graustein, W.C., Turekian, K.K. et Dowd, J.F. Radium, thorium and radioactive lead isotopes in ground waters: application to the *in-situ* determination of adsorption-desorption rate constants and retardation factors. Water Resourc. Res., 18 : 1633 (1982), cité à la référence 27.

8. Hopke, P.K. The indoor radon problems explained for the layman. ACS Symp. Ser., 331 : 572 (1987), cité à la référence 27.

9. Nazaroff, W.W., Doyle, S.M., Nero, A.V. et Sexton, R.G. Potable water as a source of airborne ^{222}Rn in U.S. dwellings: a review and assessment. Health Phys., 52 : 281 (1987), cité à la référence 27.

10. Cothern, C.R. Estimating the health risks of radon in drinking water. J. Am. Water Works Assoc., avril : 153 (1987).

11. Crawford-Brown, D. et Cothern, C. A Bayesian analysis of scientific judgement of uncertainties in estimating risk due to Rn-222 in U.S. public drinking water supplies. Health Phys., 53 : 11 (1987), cité à la référence 33.

12. Grasty, R. Summer outdoor radon variations in Canada and their relation to soil moisture. Health Phys., 66(2) : 185 (1994).

13. Gesell, T.F. Background atmospheric ^{222}Rn concentrations outdoors and indoors: a review. Health Phys., 45(2) : 289 (1983).

14. Becker III, A.P. et Lachajczyk, T.M. Evaluation of waterborne radon impact on indoor air quality and assessment of control options. EPA-600/7-84-093. Envirodyne Engineers, Inc., St. Louis, MO (1984).

15. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). National primary drinking water regulations; radionuclides; proposed rules. Fed. Regist., 56(138) : 33050 (1991).

16. Life Systems, Inc. Radon in drinking water: assessment of exposure pathways. TR-1242-87. Prepared for Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, juin (1991).

17. Crawford-Brown, D.J. An analysis of the risk of fatal cancer resulting from the occurrence of Rn-222 in public drinking water supplies, the uncertainty in risk estimates employed for establishing standards, and the impact of mitigation on the public health. Exemplaire pré-publication. Analyse préparée pour l'American Water Works Association (1991).

18. Organisation mondiale de la santé (OMS). Directives de qualité pour l'eau de boisson. 2e édition. Vol. 1. Recommandations. Genève (1993).

19. Crawford-Brown, D. et Michel, J. Measurement. Dans : Environmental radon. C. Cothern and J. Smith (dir. de publ.). Plenum Press, New York, NY. p. 59 (1987). Cité dans Clement Associates, Inc. Toxicological profile for radon (version provisoire). Préparé pour l'Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, octobre (1989).

20. Prichard, H.M. et Gesell, T.F. Rapid measurement of ^{222}Rn concentration in water with a commercial liquid scintillation counter. Health Phys., 33(6) : 577 (1977).

21. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Method 913 — Radon in drinking water by liquid scintillation. EPA Report EMSL/LV, juin (1991).

22. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Implementation strategy for the radon/radon progeny measurement proficiency evaluation and quality assurance program. EPA 520/1-86-03. Office of Radiation Programs, Washington, DC (1986), cité à référence 10.

23. Dixon, K.L., Lee, R.G., Smith, J. et Zielinski, P. Evaluating aeration technology for radon removal. J. Am. Water Works Assoc., 83(4) : 141 (1991).

24. Kinner, N.E., Malley, J.P., Clement, J.A. et Fox, K.R. Using POE techniques to remove radon. J. Am. Water Works Assoc., 85(6) : 75 (1993).

25. RCG/Hagler, Bailly, Inc. The cost of compliance with the proposed federal drinking water standards for radionuclides. Exemplaire pré-publication. Préparé pour l'American Water Works Association, octobre (1991).

26. Crawford-Brown, D.J. The biokinetics and dosimetry of radon-222 in the human body following ingestion of groundwater. Environ. Geochem. Health, 11 : 10 (1989).

27 Gosink, T.A., Baskaran, M. et Holleman, D.F. Radon in the human body from drinking water. Health Phys., 59(6) : 919 (1990).

28. International Research Council of the National Academy of Sciences. International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology. Vol. 3. National Academy of Sciences, Washington, DC (1928), cité à la référence 27.

29. von Dobeln, W. et Lindell, B. Some aspects of radon contamination following ingestion. Arkiv. Fys., 27 : 531 (1964), cité à la référence 16.

30. Hursh, J.B., Morken, D.A., Davis, R.P. et Lovass, A. The fate of radon ingested by man. Health Phys., 11 : 465 (1965), cité à la référence 27.

31. Underwood, N. et Diaz, J. A study of the gaseous exchange between the circulating system and the lungs. Am. J. Physiol., 13 : 88 (1941), cité à la référence 33.

32. Lindell, B. Ingested radon as a source of human radiation exposure. Dans : Proceedings of the First International Congress of Radiation Protection. Pergamon Press, New York, NY. p. 719 (1968), cité à la référence 33.

33. Crawford-Brown, D.J. Cancer fatalities from waterborne radon (Rn-222). Risk Anal., 11(1) : 135 (1991).

34. Cross, F.T., Harley, N.H. et Hofmann, W. Health effects and risks from ^{222}Rn in drinking water. Health Phys., 48(5) : 649 (1985).

35. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Measurement of radon and radon daughters in air. Rapport n° 97 du NCRP (1988).

36. Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Lung cancer from indoor exposure to radon daughters. Publication CIPR 50, Annales de la CIPR, vol. 17, n° 1 (1987).

37. U.S. National Academy of Sciences (NAS). Health risks of radon and other internally deposited alpha-emitters. BEIR IV. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation, National Research Council, Washington, DC. National Academy Press (1988).

38. SENES Consultants Limited (SENES). An evaluation of the risk of exposure to radon daughters. Étude préparée pour l'American Mining Congress, avril (1990).

39. Létourneau, E.G., Mao, Y., McGregor, R.G., Semenciw, R., Smith, M.H. et Wigle, D.T. Lung cancer mortality and indoor radon concentrations in 18 Canadian cities. Proceedings of the 16th Midyear Topical Symposium on Epidemiology Applied to Health Physics, 10-14 janvier 1983, Albuquerque, NM. Health Physics Society. p. 470 (1983).

40. Létourneau, E.G., Krewski, D., Choi, N.W., Goddard, M.J., McGregor, R.G., Zielinski, J.M. et Du, J. Case-control study of residential radon and lung cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada. Am. J. Epidemiol., 140(4) : 310 (1994).

41. Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Biological effects of inhaled radionuclides. Publication CIPR 31. Pergamon Press, New York, NY (1980), cité à la référence 34.

42. National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Evaluation of occupational and environmental exposure to radon and radon daughters. Rapport n° 78 du NCRP (1984), cité à la référence 34.

43. Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social. Directives d'exposition concernant la qualité de l'air des résidences. Rapport du Comité consultatif fédéral-provincial de l'hygiène du milieu et du travail. Direction de l'hygiène du milieu, Direction générale de la protection de la santé, Ottawa (1990).